1982—2017年典型干旱年的中国GPP变化

曹玉娟[1,2]，　司文洋[1,2]，　杜自强[1,2]，　梁寒雪[1,2]，
雷添杰[3]，　孙　斌[4]，　武志涛[1,2]

（1. 山西大学黄土高原研究所，山西　太原　030006；2. 山西省黄河实验室，山西　太原　030006；3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所，北京　100081；4. 中国林业科学研究院资源信息研究所，北京　100091）

摘　要： 干旱导致的总初级生产力（GPP）的减少会对陆地碳汇产生重大影响。基于全国618个站点的月气象数据计算的标准降水蒸散指数（SPEI）和2套公开的GPP数据集（EC-LUE GPP和GLASS GPP），系统分析了中国1982—2017年典型干旱年的GPP在不同时间尺度下受不同程度干旱影响的变化。结果表明：（1）基于SPEI的5个选取指标，选出1982—2017年典型干旱的年份为2001年和2011年。（2）在年和季节尺度上，2001年的GPP受干旱影响严重区域主要在华北、东北和中东部地区的北部，2011年主要集中在西南地区的东南部和中东部地区。月尺度上，2001年5月的GPP受干旱影响最严重，主要集中在华北和东北的大部分区域。2011年1月GPP受干旱影响最为严重，主要集中在中东部地区的大部分区域。（3）无论是年、季节还是月尺度，随着干旱程度的加重，导致GPP的下降率越大，极端干旱的影响最大。从季节尺度看，2001年夏季极端干旱造成GPP下降率分别为19.96%（EC-LUE GPP）和15.57%（GLASS GPP）；2011年春季极端干旱造成GPP下降率分别为14.32%（EC-LUE GPP）和8.75%（GLASS GPP）。研究结果可进一步加深不同时间尺度下不同等级干旱对GPP影响的认识，对了解干旱条件下陆地与大气之间的碳交换具有重要意义。

关 键 词： 典型干旱；标准化降水蒸散指数；总初级生产力；中国
文章编号： 1000－6060（2023）10－1577－14（1577～1590）

干旱是一种与天气有关的自然现象，可在全球范围内造成严重的环境、社会和经济后果。它还被认为是一种潜在的自然灾害，根据受影响的人数来看，它在所有自然灾害中排名第一[1-2]。气候变化预计将在21世纪中后期增加干旱的频率和强度[3-7]。干旱可以通过影响生态系统的组成、结构和功能来改变陆地的碳循环[8]。在极端气候条件下，增强的干旱和热浪可能改变陆地生态系统的结构或功能，超出典型或正常变异的范围[9-10]。当植物群落利用的抗旱措施（如气孔关闭）被植物的水力限制或进一步胁迫时，可能会发生极端干旱导致的生态系统功能的丧失[11]。在极端干旱期间，生态系统功能的丧失可能会导致生态系统从碳汇向碳源转移，从而强烈地影响土地与大气之间的碳交换[11-12]。

陆地生态系统提供了巨大的碳汇，并在减缓CO_2浓度的增加和全球变暖方面发挥着不可替代的作用[13]。陆地总初级生产力（GPP）是陆地生态系统通过植被光合作用固定的碳总量[14-16]，是碳循环的开始，反映了陆地生态系统的生产力水平[17-19]。然而，干旱的严重程度和频率显著影响了陆地GPP值的变化。近年来，干旱导致的全球陆地生态系统初级生产力下降更加频繁[20-24]。2009—2010年亚马逊地区和欧洲的干旱导致全球净初级生产力减少了0.65 Pg C[25]，2003年一场严重的热浪和干旱使整个欧洲的GPP下降了约30%[26]。因此，定量研究重大干旱对陆地生态系统产生的影响对于碳循环变化

收稿日期： 2023-02-23；　**修订日期：** 2023-03-06
基金项目： 国家自然科学基金（41977412）；山西省科技创新人才团队专项（202204051001010）资助
作者简介： 曹玉娟（1997-），女，硕士研究生，主要从事陆地生态系统与全球变化等方面的研究. E-mail: 2409951683@qq.com
通讯作者： 武志涛（1985-），男，博士，教授，主要从事区域生态学、全球生态学、"3S"技术的应用等方面的研究. E-mail: wuzhitao@sxu.edu.cn

的研究具有重要意义。

干旱指数是评价干旱最直观且最简单的度量指标,它通过将一个或几个变量(如温度、降水和潜在蒸散发)的数据转化为单一数值来描述干旱严重程度、开始和持续时间,如帕默干旱严重程度指数(PDSI)[27]、标准降水指数(SPI)[28]和标准降水蒸散指数(SPEI)[29],PDSI很大程度上依赖于土壤中的水分,同时PDSI可能无法捕捉月度时间尺度的干旱,由于其对以往气候条件的长期记忆,对干旱恢复也不敏感[30],而SPI仅基于降水异常角度。SPEI[29]是在SPI的基础上引入了相关的蒸散变量,且在时间尺度上比PDSI更灵活,因此使用范围较广。

目前,针对植被GPP的估算方法主要包括生物量调查法、涡度相关法和模型模拟[31-32],而使用较多的还是模型模拟的方法。模型模拟方法在大区域、长时序植被GPP估算方面具有一定的优势[32]。许多基于卫星数据的模型已被用于估计区域和全球尺度上的GPP,这些模型主要分为3类:基于辐射转换效率理论的光利用效率的模型[33]、基于机器学习的模型[34]和基于植被光合作用生物物理过程的模型[35]。然而,各种研究发现[36-39],由于输入数据、模型参数和模型结构的差异,不同模型的时空GPP数据集之间存在明显差异。而在所有的模型预测方法中,光利用效率模型可能最有潜力充分解决GPP的时空动态[40]。为了避免分析结果的差异性,许多研究也采用多套GPP数据对比分析的方式进行研究。如杜文丽等[41]的研究结果表明,2种不同GPP数据在1980—2013年在中国地区呈现的时间变化趋势的空间分布格局较为一致;童志辉等[42]对VPM模型评估的GPP、地面测量的GPP以及MODIS GPP产品(MOD17A2H)进行了比较,发现不同方式评估的GPP结果存在一定差异。

基于上述背景,本文基于SPEI和改进后的EC-LUE模型及贝叶斯多算法集成方法(GLASS)生成的2套GPP数据,定量探究1982—2017年的典型干旱年份内不同时间尺度下GPP受不同等级干旱影响的变化情况,以期更好地了解未来气候下的生态系统响应。

1 数据与方法

1.1 数据来源

1.1.1 GPP数据 第一种是修正后的光能利用率模型模拟的GPP数据集[43]。该数据集提供1982—2017年8 d时间尺度的全球GPP,分辨率为0.05°。GPP数据集可在https://doi.org/10.6084/m9.figshare.8942336.v3获得。

第二种是采用贝叶斯多算法集成方法生成的GPP数据集[44]。该数据集来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据共享服务平台(http://www.geodata.cn),空间分辨率为0.05°,时间尺度是8 d。

1.1.2 干旱数据 收集了中国国家气候中心756个气象站1982—2017年月降水、气温、最高和最低气温、风速、相对湿度和日照时数。为了满足无缺失数据SPEI的计算要求,共选择618个站点对不同时间尺度(月、季和年)相应的SPEI值进行计算和分析,并利用反距离权重插值法将点数据转变为面数据。月SPEI(SPEI-1)是1个月尺度的值,3个月时间尺度的5、8、11月的SPEI值(SPEI-3)分别表示研究区春(3—5月)、夏(6—8月)、秋(9—11月)季SPEI值,年SPEI(SPEI-12)是12个月尺度的值[45]。潜在蒸散采用Penman-Monteith模型计算,通过计算全国逐月降水量与潜在蒸散的差值,从而建立不同时间尺度的水分盈亏累积序列,由于存在正负数值,采用3个参数的log-logistic概率分布函数对累计概率密度进行标准化处理,得到对应的SPEI指数[46],具体计算方法详见文献[29]。根据国家气象局制定的《气象干旱等级》,将SPEI指数划分为不同的干旱等级[47-48](表1)。

1.2 研究方法

典型干旱年的GPP受干旱影响的定量化方法通过比较正常年份的长期平均GPP和干旱年份的

表1 SPEI的干旱分类

Tab. 1 Drought classification of SPEI

干旱等级	极端干旱	重度干旱	中度干旱	轻度干旱	正常
SPEI	≤-2.0	≤-1.5	≤-1.0	≤-0.5	≤0.5

注:SPEI为标准降水蒸散指数,按SPEI值的范围划分干旱等级。下同。

GPP来评估干旱的影响[49]。

$$\Delta GPP = GPP_{dmod} - GPP_{amod} = GPP_{dmod} - \frac{1}{n}\sum_{1}^{n} GPP_{i} \quad (1)$$

式中：ΔGPP 为干旱造成的GPP异常（可为正值或负值）；GPP_{dmod} 为干旱年的模拟值；GPP_{amod} 为正常年多年平均模拟值；GPP_i 为第i个正常年的模拟值；n为正常年的年数。

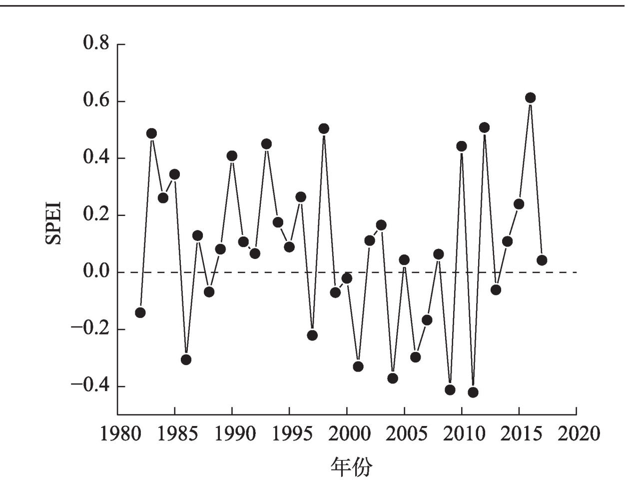
2　结果与分析

2.1　中国SPEI时间变化特征

分析1982—2017年中国SPEI的变化趋势（每年的值为618个站点SPEI的平均值）可知，SPEI最小的4 a分别为2001、2004、2009年和2011年（图1）。参考卫洁[50]的文献，本文选择基于SPEI计算的5个指标来识别典型干旱年。如表2所示，通过分析近36 a来全国618个站点的气象数据计算的SPEI结果可知，发生干旱站点百分比最大的4 a分别为2001、2004、2009年和2011年，没有任何年份的轻度干旱站点百分比超过50%，中度干旱站点百分比超过20%的年份只有1986年，重度干旱站点百分比超过10%的年份分别为1997、2001年和2011年。通过以上指标选取的结果分析表明，发生典型干旱的年份主要是2001年和2011年。

2.2　典型干旱年对年GPP影响的定量评估

利用不同GPP数据集，分析典型干旱年（2001年和2011年）年尺度不同等级干旱（图2）对GPP的影响（图3、表3）。由图2~3可知，2001年的干旱主要发生在华北、东北及中东部地区的北部，GPP出现



注：SPEI为标准降水蒸散指数，该值为每年所有站点SPEI值的均值。

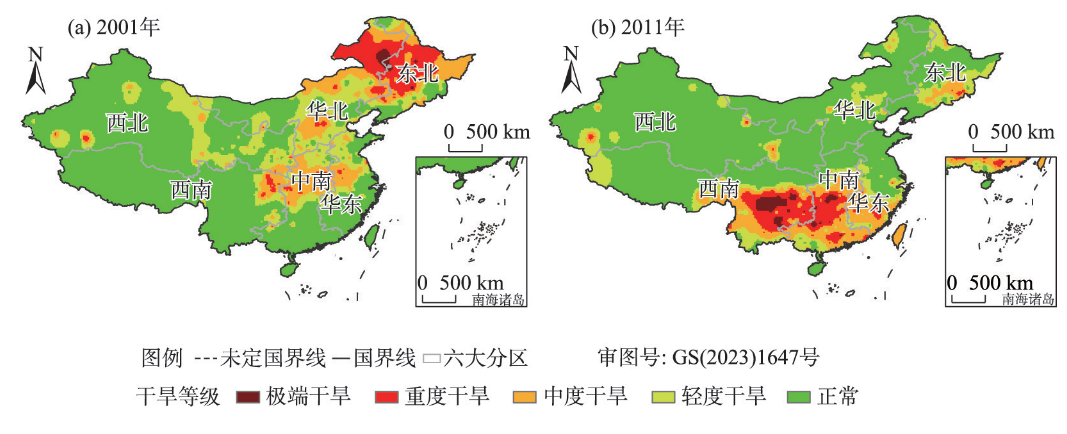
图1　1982—2017年中国SPEI的时间变化特征

Fig. 1　Temporal change characteristics of SPEI in China from 1982 to 2017

表2　1982—2017年干旱程度较严重年份的选取结果

Tab. 2　Results of years with more severe drought selected from 1982 to 2017

指标	选取年份
SPEI最小的4 a	2001、2004、2009、2011
发生干旱站点百分比最大的4 a	2001（47.4%）、2004（48.1%）、2009（47.7%）、2011（48.9%）
轻度干旱站点百分比超过50%	–
中度干旱站点百分比超过20%	1986（20.6%）
重度干旱站点百分比超过10%	1997（10.8%）、2001（10.0%）、2011（13.3%）



注：GPP为植被总初级生产力。空白部分为无植被区。下同。

图2　典型干旱年的年不同等级干旱（SPEI-2）空间分布

Fig. 2　Spatial distributions of different levels of drought in typical drought years based on SPEI-12

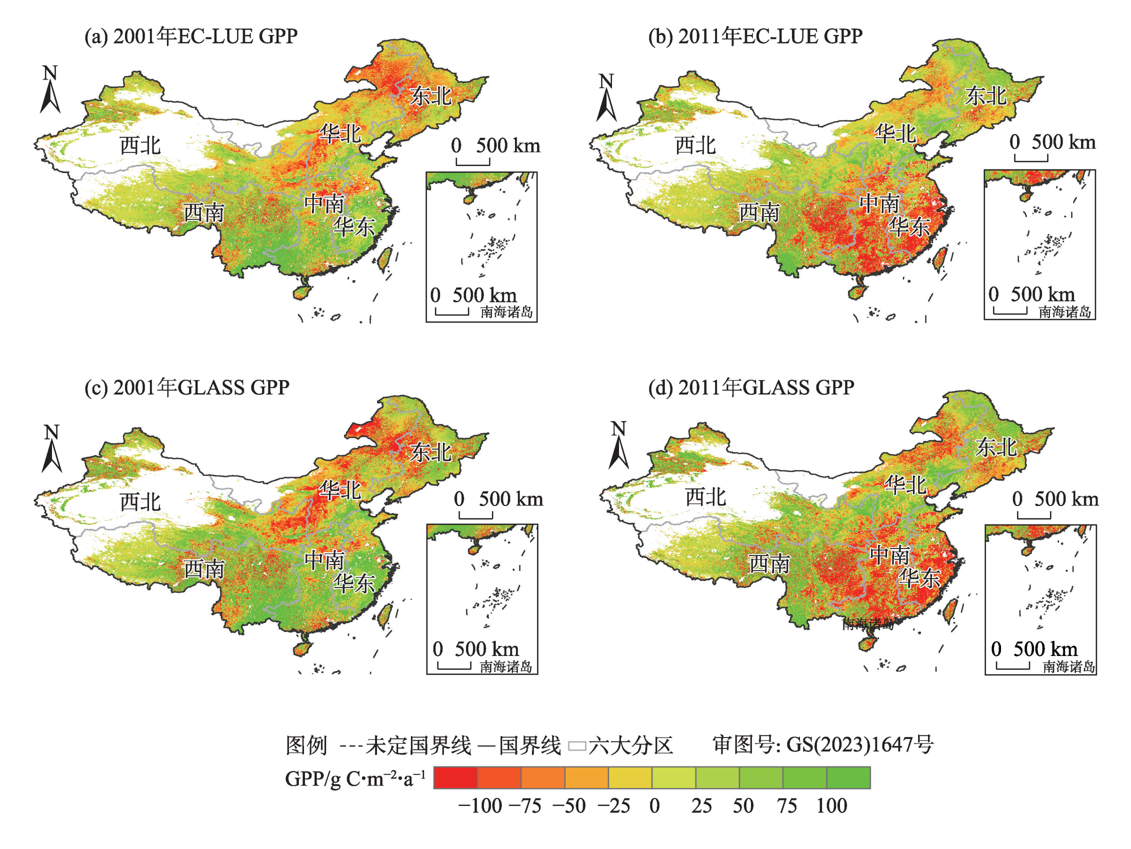


图3 典型干旱年内受干旱影响的年均GPP变化的空间分布

Fig. 3 Distributions of annual GPP changes affected by drought in typical drought years

表3 典型干旱年不同等级干旱对年GPP影响的比例

Tab. 3 Proportion of the annual GPP affected by different levels of drought in the typical drought years /%

干旱等级	2001年		2011年	
	EC-LUE GPP占比	GLASS GPP占比	EC-LUE GPP占比	GLASS GPP占比
轻度干旱	−7.77	−6.87	−7.00	−6.49
中度干旱	−8.77	−7.09	−7.33	−5.94
重度干旱	−14.04	−10.12	−9.41	−7.16
极端干旱	−21.77	−16.01	−9.69	−6.72

减少的区域主要出现在华北、东北和中东部地区的北部；而2011年的干旱主要发生在西南地区的中南部和中东部地区的中南部，GPP出现减少的区域主要出现在西南地区的东南部和中东部地区。由表3知，2001年轻度干旱、中度干旱、重度干旱和极端干旱造成EC-LUE GPP损失的比例分别为7.77%、8.77%、14.04%和21.77%，GLASS GPP损失的比例分别为6.87%、7.09%、10.12%和16.01%；2011年不同等级干旱造成EC-LUE GPP损失的比例分别为7.00%、7.33%、9.41%和9.69%，GLASS GPP损失的比例分别为6.49%、5.94%、7.16%和6.72%。不同等级干旱影响GPP发生了不同程度的变化，除了2011年的GLASS GPP外，不论是2001年还是2011年都表现出极端干旱造成的GPP损失比例最大，然后依次是重度干旱、中度干旱和轻度干旱，这表明随着干旱强度的梯度增加，GPP受到的损害越大。

2.3 典型干旱年对季节GPP影响的定量评估

针对不同GPP数据集，比较典型干旱年(2001年)期间不同等级季节性干旱(图4)对相应季节GPP影响(图5、表4)。由图4~5可知，春季干旱主要发生在华北中南部、东北西南部及中东部地区的北部，GPP出现减少的区域主要出现在中国的北部地区；夏季干旱主要发生在华北、东北的中北部、中东的北部及西北的中东部，GPP出现减少的区域主

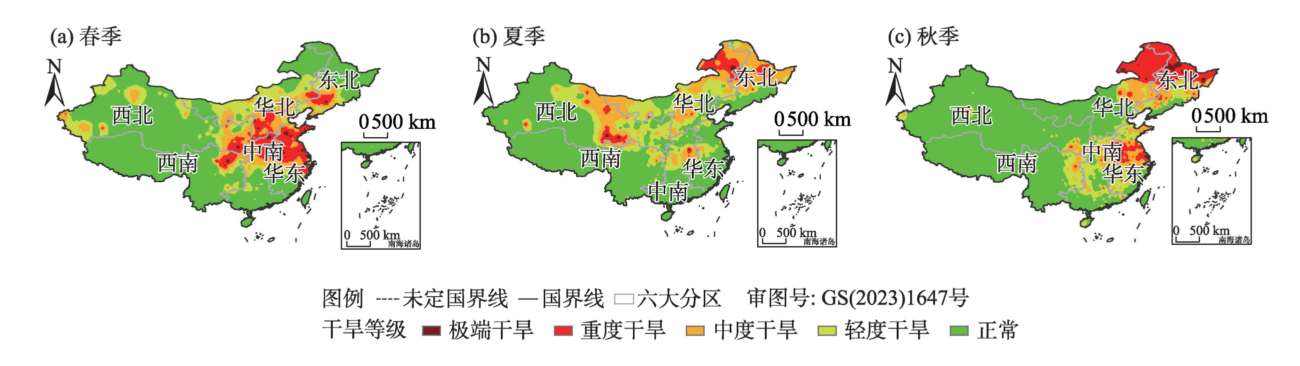


图4 2001年不同等级季节性干旱(SPEI-3)空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of different levels of seasonal drought in typical drought years based on SPEI-3 in 2001

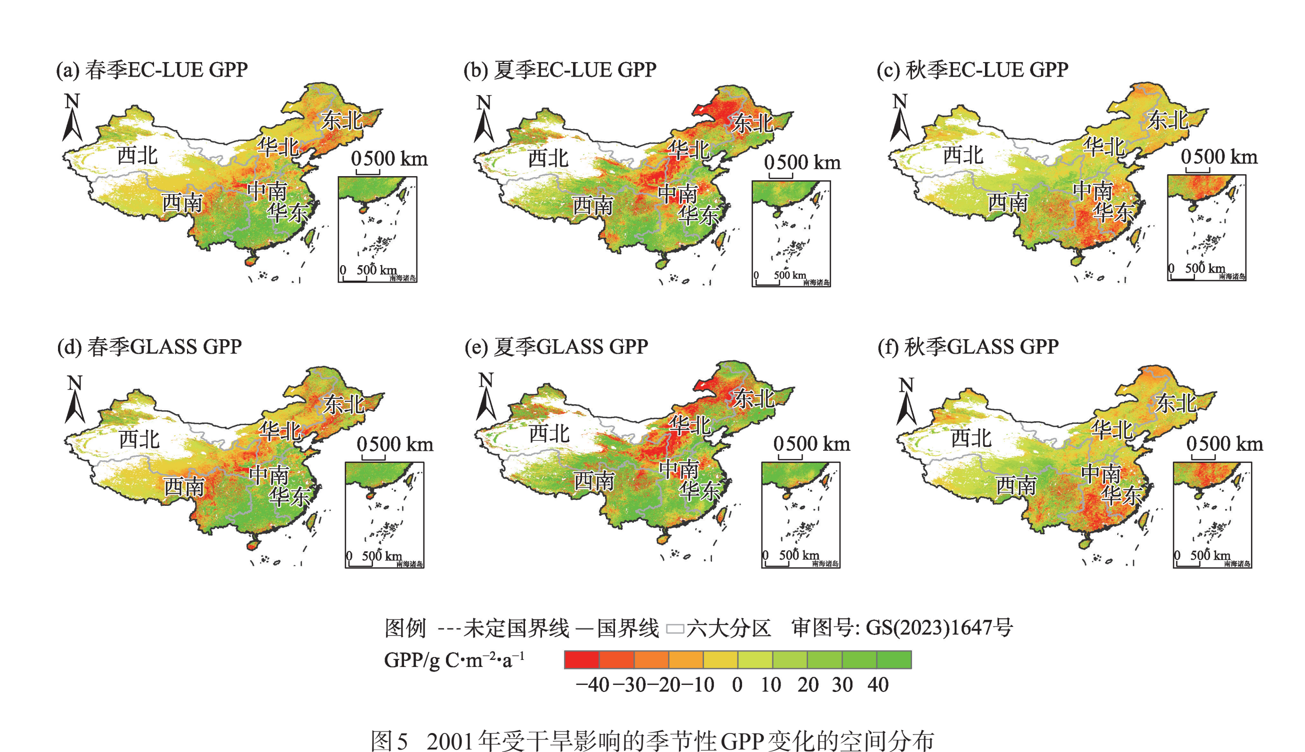


图5 2001年受干旱影响的季节性GPP变化的空间分布

Fig. 5 Distributions of seasonal GPP changes affected by drought in 2001

表4 典型干旱年不同等级干旱对季节GPP影响的比例

Tab. 4 Proportion of the seasonal GPP affected by different levels of drought in the typical drought years /%

季节	GPP类型	2001年				2011年			
		轻度干旱	中度干旱	重度干旱	极端干旱	轻度干旱	中度干旱	重度干旱	极端干旱
春季	EC-LUE GPP	−12.34	−12.71	−9.47	−9.52	−9.25	−12.31	−13.23	−14.32
	GLASS GPP	−10.86	−10.38	−6.99	−7.16	−7.25	−8.98	−8.28	−8.75
夏季	EC-LUE GPP	−11.89	−12.66	−18.61	−19.96	−6.62	−8.95	−9.01	−9.41
	GLASS GPP	−10.17	−10.15	−13.47	−15.57	−8.72	−6.75	−6.72	−4.89
秋季	EC-LUE GPP	−7.12	−8.68	−14.03	−10.16	−4.53	−6.54	−6.62	−9.23
	GLASS GPP	−5.71	−7.21	−13.78	−9.39	−5.61	−6.08	−8.34	0.00

要出现在华北、东北及中东的北部；秋季干旱主要发生在华北的中东部、东北及中东部地区的中北部，GPP出现减少的区域主要出现在华北、东北和中东部地区。从表4可知，不同等级的干旱对夏季

GPP造成损失的比例较大，轻度干旱、中度干旱、重度干旱和极端干旱对EC-LUE GPP造成损失的比例分别为11.89%、12.66%、18.61%和19.96%，GLASS GPP的分别为10.17%、10.15%、13.47%和15.57%。2套GPP数据结果都表明，2001年干旱对夏季GPP造成的损失较严重，然后是秋季，最后是春季。这也间接说明北方地区在夏季受到干旱的影响较大。

针对不同GPP数据集，比较典型干旱年(2011年)期间不同等级季节干旱(图6)对相应季节GPP的影响(图7、表4)。由图6~7可知，春季干旱主要发生在西南地区的东部及中东部地区，GPP出现减少的区域主要出现在西南地区的东部及中东部地区；夏季干旱主要发生在西南地区的中东部和中东的南部地区，GPP出现减少的区域主要出现在华北的北部和中国的南部地区；秋季干旱主要发生在西南的中部、华北的东部和东北地区，GPP出现减少的区域主要出现在西南地区的东部及中东部地区。从表4可知，不同等级干旱对春季GPP造成损失的比例较大，轻度干旱、中度干旱、重度干旱和极端干旱对EC-LUE GPP造成损失的比例分别为9.25%、12.31%、13.23%和14.32%，GLASS GPP的分别为7.25%、8.98%、8.28%和8.75%。2套GPP数据结果都表明，2011年干旱对春季GPP造成的损失较严重，然后是夏季，最后是秋季。这也间接说明南方

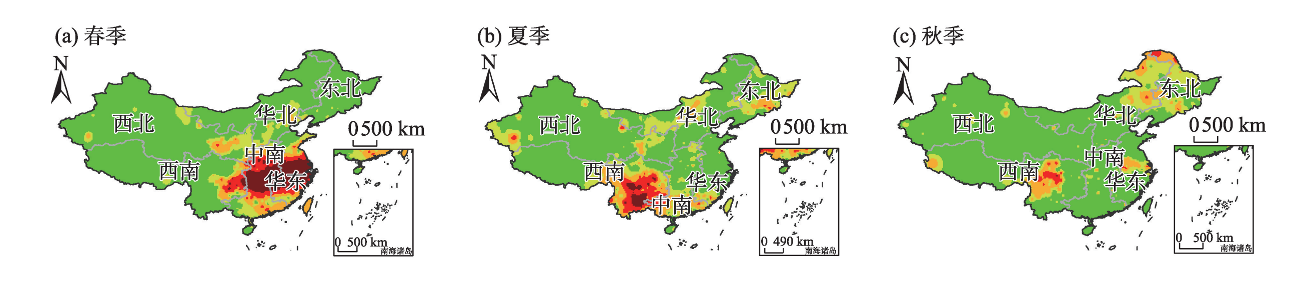


图6 2011年不同等级季节性干旱(SPEI-3)的空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of different levels of seasonal drought in typical drought years based on SPEI-3 in 2011

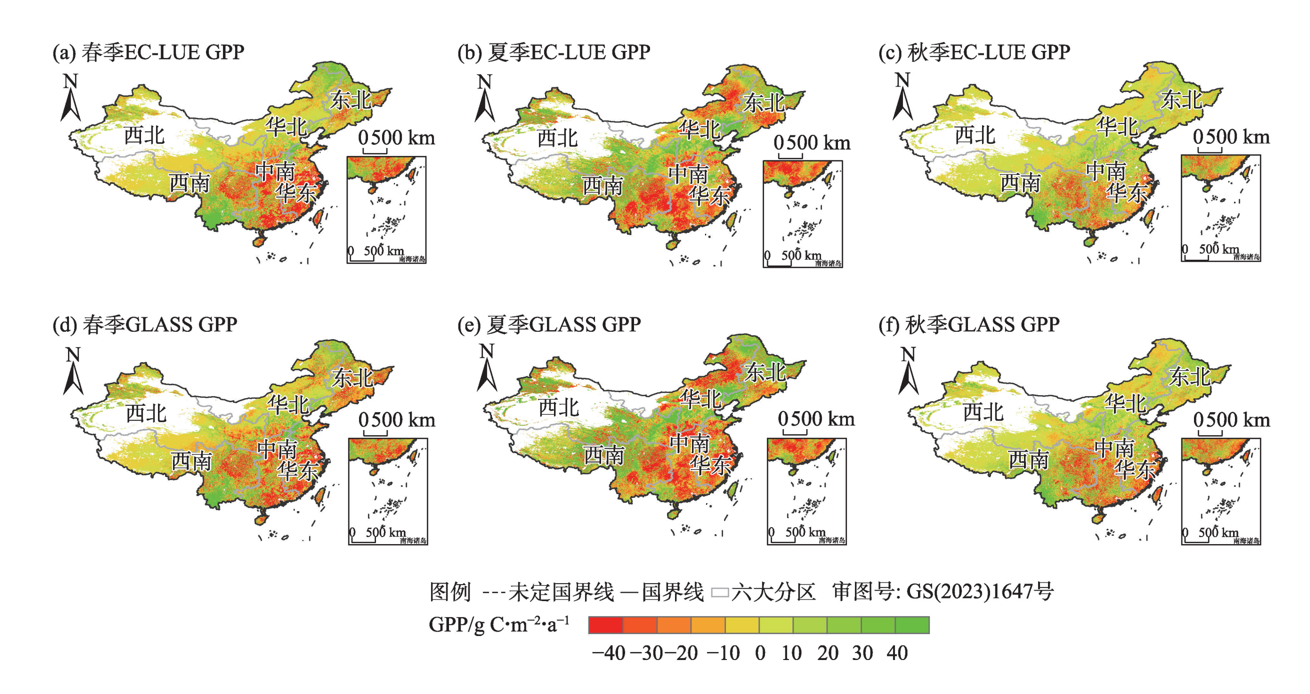


图7 2011年受干旱影响的季节性GPP变化的空间分布

Fig. 7 Distributions of seasonal GPP changes affected by drought in 2011

地区在春季受到干旱的影响较大。

2.4 典型干旱年对月GPP影响的定量评估

针对不同GPP数据集，比较典型干旱年(2001年)期间各月不同等级干旱(图8)对相应月GPP的影响(图9、表5)。由图8可知，1、2月干旱不明显，3月干旱出现的范围扩大主要出现在华北的西部地区，4月干旱开始大范围出现在华北中西部、东北南部、中东部地区的北部和西北部分地区。4—12月华北地区和东北地区的干旱持续不断且很严重，期间中东部地区的北部也一直伴随着干旱，在这期间5月发生的干旱波及范围极广且基本都是重度干旱，涉及的区域有华北、东北、西北及中东部地区。图9显示出东北和华北地区受干旱影响出现GPP下降的时间基本发生在5—9月，东北和西北地区主要是5月，中南、华东地区的GPP基本都集中在9月之后，但是在5月这2个地区的GPP骤降，而西南地区受到干旱的影响极小。干旱出现的时间和区域与GPP下降的时间与区域基本一致。由表5可知，不

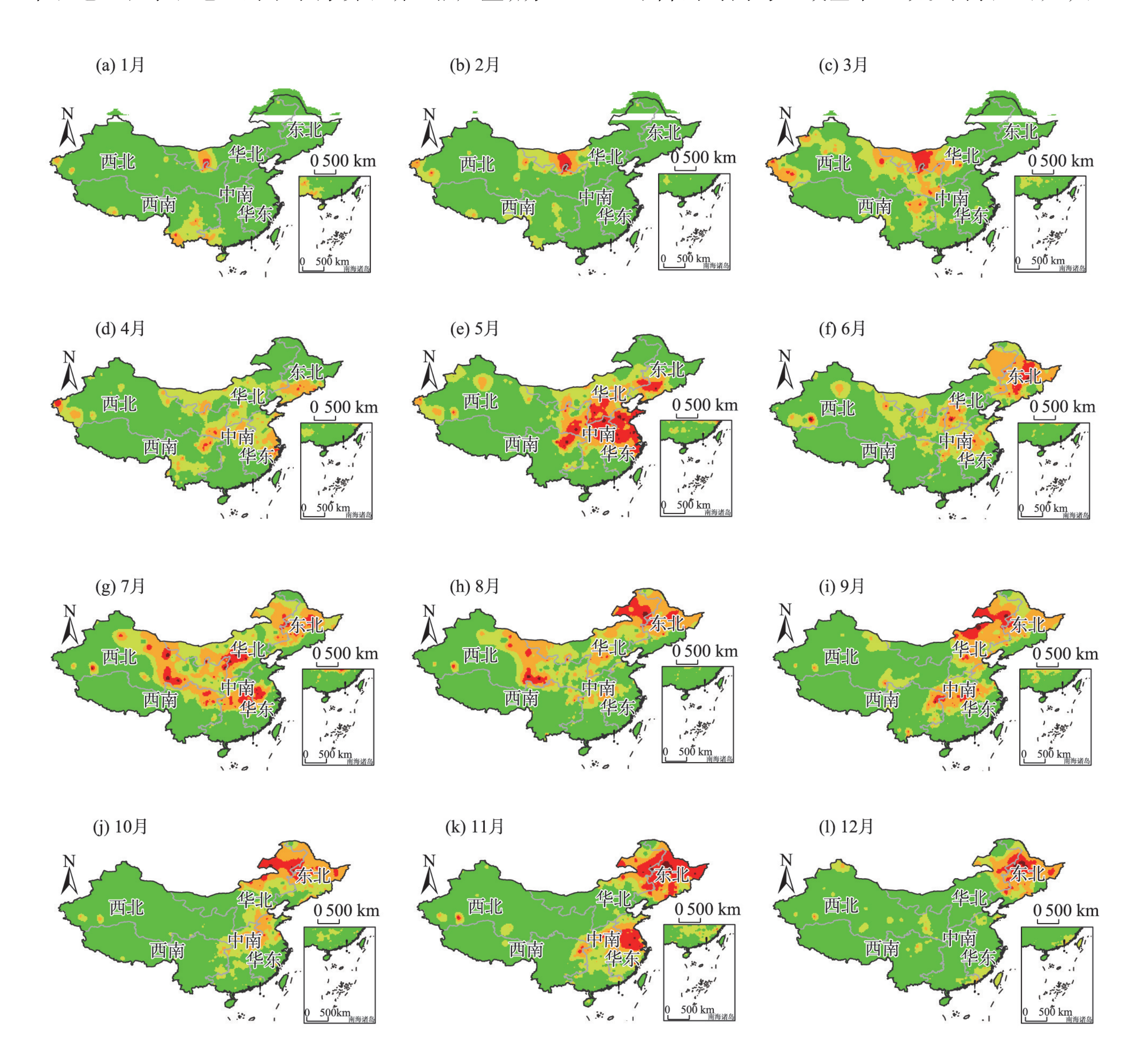


图8 2001年不同等级月尺度干旱(SPEI-1)空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of different levels of monthly drought based on SPEI-1 in 2001

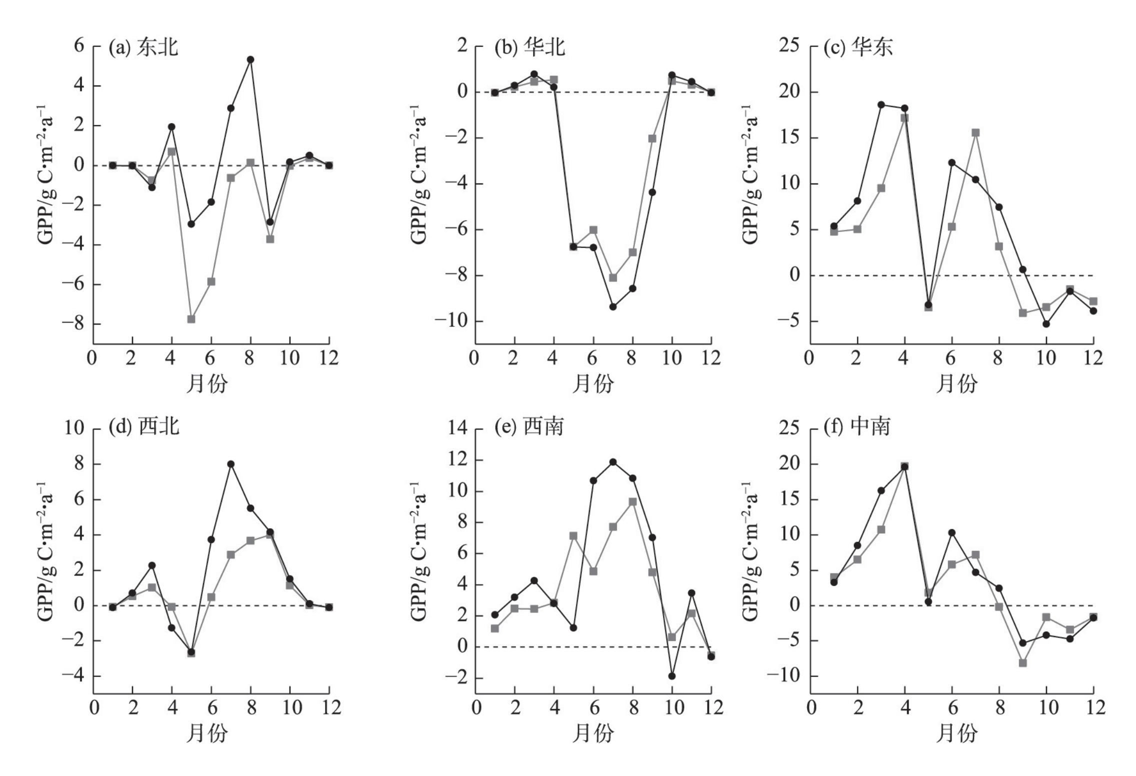


图9 2001年各月不同区域GPP受干旱影响的平均变化

Fig. 9 Average changes in GPP affected by drought in different regions in each month of 2001

表5 2001年不同等级干旱对月GPP影响的比例

Tab. 5 Proportion of the monthly GPP affected by different levels of drought in 2001 /%

月份	GPP类型	轻度干旱	中度干旱	重度干旱	极端干旱
5	EC-LUE GPP	−18.80	−22.54	−22.74	−22.91
	GLASS GPP	−15.63	−22.10	−15.17	−15.43
6	EC-LUE GPP	−10.66	−18.59	−20.17	−15.48
	GLASS GPP	−8.35	−13.29	−12.12	−9.64
7	EC-LUE GPP	−13.48	−13.91	−15.88	−19.42
	GLASS GPP	−11.37	−11.19	−13.82	−17.31
8	EC-LUE GPP	−11.38	−12.50	−18.61	−18.62
	GLASS GPP	−10.94	−12.02	−17.52	−14.81
9	EC-LUE GPP	−9.23	−11.43	−18.13	−17.64
	GLASS GPP	−8.31	−9.77	−15.94	−16.29

同等级干旱对GPP影响极大的时间主要发生在5—9月,这几个月中轻度干旱、中度干旱、重度干旱和极端干旱都导致GPP减少。其中,对GPP影响最严重的是5月,轻度干旱对EC-LUE GPP和GLASS GPP造成损失的比例分别为18.80%和15.63%,中度干旱对其造成损失的比例分别为22.54%和22.10%,重度干旱对其造成损失的比例分别为22.74%和15.17%,极端干旱对其造成损失的比例分别为22.91%和15.43%。这说明2001年受干旱影响最严重的时间是5月且受到极端干旱的影响最严重,受到影响的地区主要是华北和东北的大部分区域。

针对不同GPP数据集,比较典型干旱年(2011年)期间各月不同等级干旱(图10)对月GPP的影响(图11、表6)。由图10可知,1月重度干旱就开始出现在华北南部和中东部地区的北部,2月这些地区的干旱得到一定的缓和,3月干旱主要发生在中东部地区,4、5月干旱还是主要出现在中东部地区但是干旱程度明显加强,6月之后干旱开始向其他地

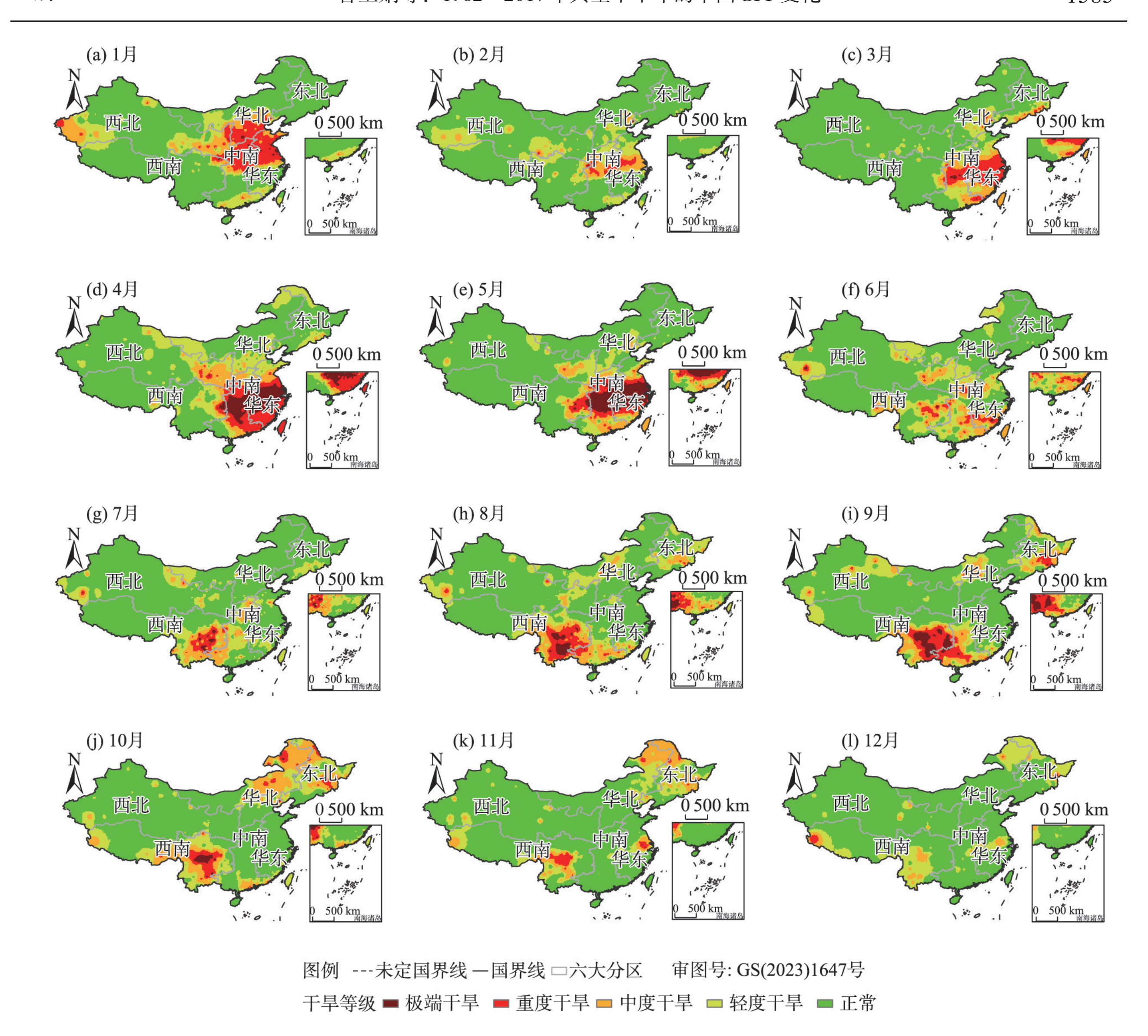


图10　2011年不同等级月尺度干旱(SPEI-1)空间分布

Fig. 10　Spatial distributions of different levels of monthly drought based on SPEI-1 in 2011

区扩散，逐渐转移到西南地区的中南部并且干旱程度也开始下降。在这期间4、5月发生的干旱波及范围极广且干旱程度严重。图11显示出东北地区受干旱影响出现GPP下降的时间发生在4月，西北地区主要是3月，中南、华东地区是除了2、3月基本都呈下降，华北地区主要是6月，而西南地区主要是1月。干旱出现的时间和区域与GPP下降的时间与区域基本一致。由表6可知，不同等级干旱对GPP影响极大的时间主要发生在1月及4—8月，这几个月中轻度干旱、中度干旱、重度干旱和极端干旱都导致GPP减少。其中，对GPP影响最严重的是1月，轻度干旱对EC-LUE GPP和GLASS GPP造成损失的比例分别为48.46%和51.16%，中度干旱对其造成损失的比例分别为86.29%和86.68%，重度干旱对其造成损失的比例分别为91.99%和91.86%，极端干旱对其造成损失的比例分别为97.91%和97.89%。这说明2011年期间受干旱影响最严重的时间是1月且受到极端干旱的影响最严重，受到影响的地区主要是中东部地区的大部分区域。

3　讨 论

本文的目的是利用不同的GPP数据集探究干旱对GPP变化的影响。研究表明干旱对GPP的影响随着干旱强度的增加表现出越来越严重的损害，

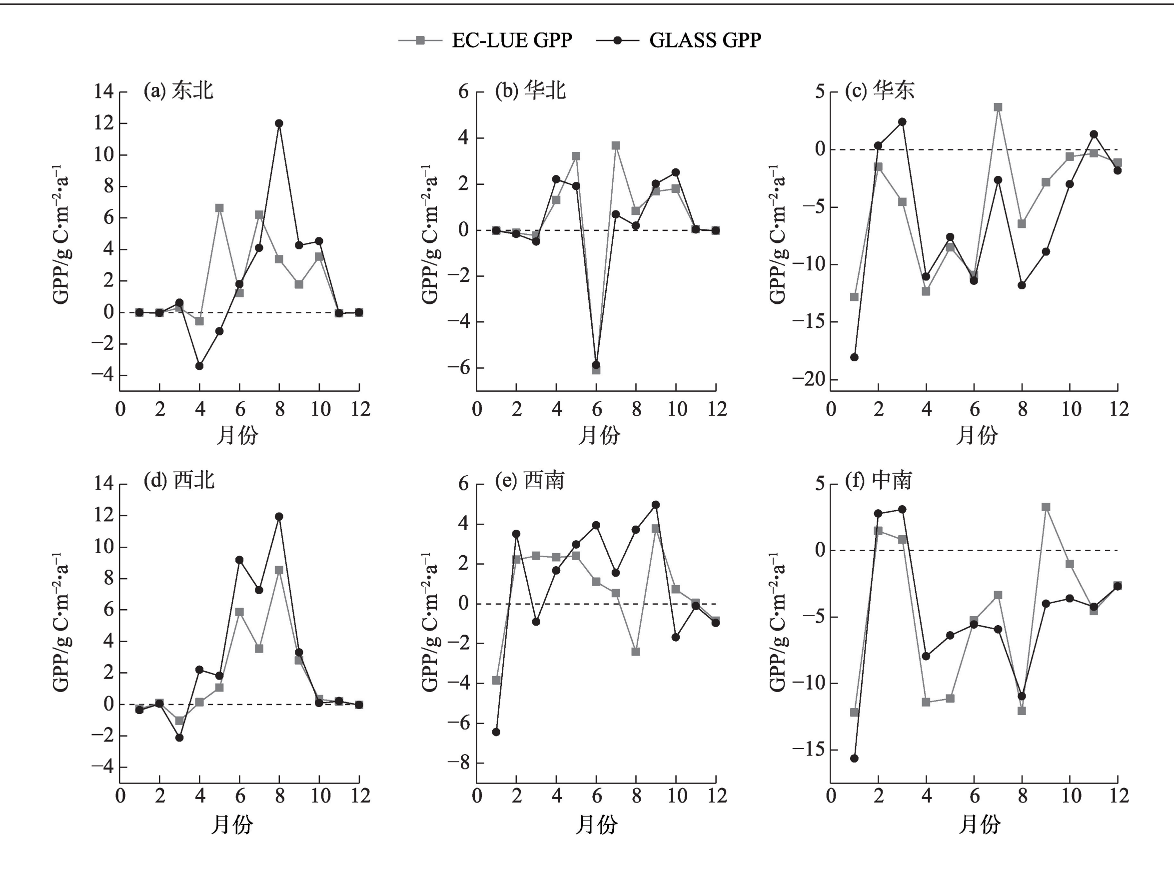


图11 2011年各月不同区域GPP受干旱影响的平均变化

Fig. 11 Average changes in GPP affected by drought in different regions in each month of 2011

表6 2011年不同等级干旱对月GPP大小影响的比例

Tab. 6 Proportion of the monthly GPP affected by different levels of drought in 2011 /%

月份	GPP类型	轻度干旱	中度干旱	重度干旱	极端干旱
1	EC-LUE GPP	−48.46	−86.29	−91.99	−97.91
	GLASS GPP	−51.16	−86.68	−91.86	−97.89
4	EC-LUE GPP	−10.35	−15.32	−16.75	−17.36
	GLASS GPP	−9.23	−9.96	−10.59	−11.28
5	EC-LUE GPP	−9.61	−12.88	−13.17	−14.80
	GLASS GPP	−6.92	−8.83	−8.12	−10.00
6	EC-LUE GPP	−11.10	−10.62	−12.90	−18.31
	GLASS GPP	−9.23	−7.26	−7.31	−8.42
7	EC-LUE GPP	−8.31	−8.80	−9.20	−5.46
	GLASS GPP	−7.58	−6.56	−6.57	−2.89
8	EC-LUE GPP	−10.97	−12.28	−15.78	−12.14
	GLASS GPP	−9.27	−8.32	−9.94	−6.54

如研究干旱对草地净初级生产力影响的结果也表明随着干旱强度的梯度增加，NPP显著降低[49−50]，但不同GPP在不同年份的不同时间尺度上并不都是这一结论。这可能与GPP模拟过程的误差性[43,51]和不同等级干旱出现的区域的植被耐旱性有关，王小红等[52]的研究表明不同植被类型的抗旱能力不同。2001年受干旱影响最大的季节是夏季，月份是5月，受到严重干旱的区域主要是在中东部北部地区、华北的大部分区域和东北的部分地区，因为华北地区属于半干旱区[53]对于干旱有一定的承受能力，而东北地区对于气候变化的影响存在滞后响应[54]，这使得干旱影响有一定的滞后性。2011年受干旱

影响最大的季节是春季，月份是1月，受到严重干旱的地区主要是中东部地区的大部分区域，这可能是由于中东部地区属于亚热带区域，这里的植被一年四季常绿，植物类型多样生存条件良好但在极端条件下也很容易受到影响，在冬天时植被的生长环境本来就差，当气候发生较大变化时更容易造成植被的损失[55]，因此相比4、5月来说1月的损失更大。

GPP数据模拟结果存在较大的不确定性。EC-LUE GPP和GLASS GPP数据都是光能利用率模型模拟的结果，本研究显示2套数据的结果基本一致，但其空间分布及数值的大小仍存在较大的差异性，这可能是由于模型选择的不同、参数的差异及多种误差所造成的。文中结果显示EC-LUE GPP受不同等级干旱影响损失的GPP比例与GLASS GPP的比例存在一定差异，这可能是因为EC-LUE GPP模拟过程中整合了大气CO_2浓度、辐射成分和大气水汽压差[43]，这使得GPP的模拟结果严重受气候因素的影响，而干旱条件下这些气候因素会发生极大的波动。GLASS GPP模拟是集合目前国际上应用广泛的8个光能利用率模型，集成多种算法生成了GLASS产品，降低了单一算法的不确定性，保证了产品的精度和质量，但这一模拟过程使用了遥感和气象数据及基于涡相关通量站点的数据，然而地面数据和卫星数据在空间尺度上存在差异，如C4作物的光合能力强于C3作物，但在算法中，C3和C4作物的潜在光合作用没有差异，混合像素的问题也会影响GLASS GPP估计的精度[51]，这些因素都会使GLASS GPP的模拟结果存在偏差。

由于干旱的复杂性，目前针对不同干旱类型和不同干旱对象没有一个单一的指标可以描述干旱的所有时空特征，适用不同地区的干旱研究，并评价干旱对环境和社会的影响[56]。此外，不同的指数对相同的干旱事件可能产生不同的结果。SPEI是一种干旱指数用来表征干旱情况，然而表征干旱的指数多种多样，不同的干旱指数各有其优缺点，利用多个指标对比可以降低干旱评估的不确定性。如张世喆等[57]的研究结果表明，在中国SPI和SPEI表征的干旱趋势一致，除青藏高原高寒植被区外都呈现变干趋势，但其在分布区域及范围大小上存在一定差异。用5个干旱指数研究全球GPP对干旱的响应特征，5个指数表征的全球干旱趋势具有相似性，但GPP对其的响应存在明显的区域差异性[58]。

本文只考虑了干旱这一单一因素，没有研究其他因素或者干旱与其他因素之间的相互作用对GPP的影响。然而，在自然界中，有许多非生物和生物因素通过复杂的机制改变了干旱和生态系统之间的关系[59]，例如，空气温度的变化和土地利用的变化都可以增强或减少不同植被类型对NPP的影响[60-61]。不同区域的气候条件、植被类型和物候期等也存在一定差异，这种差异会导致某些区域的植被生长不只受到干旱的影响，还会因为其他因素的作用致使GPP的变化受到影响，如张世喆等[57]指出温带草原、亚热带常绿阔叶林和暖温带落叶阔叶林是受干旱和温度共同影响较大的植被区。

4 结 论

(1) 年和季节尺度上，2001年的GPP受干旱影响严重区域主要在华北、东北和中东部地区的北部，2011年主要集中在西南地区的东南部和中东部地区。2001年和2011年的干旱都给中东部地区带来了一定影响，2001年的干旱主要集中在北方地区，而2011年主要集中在南方地区。

(2) 月尺度上，2001年5月的GPP受干旱影响最严重，主要集中在华北和东北的大部分区域。2011年1月GPP受干旱影响最为严重，主要集中在中东部地区的大部分区域。2001年干旱主要在北方地区，而2011年主要在南方地区。

(3) 无论是年、季节还是月尺度，随着干旱程度的加重，导致GPP的下降率越大，极端干旱的影响最大。从季节尺度看，2001年夏季极端干旱造成GPP下降率分别为19.96%(EC-LUE GPP)和15.57%(GLASS GPP)；2011年春季极端干旱造成GPP下降率分别为14.32%(EC-LUE GPP)和8.75%(GLASS GPP)。

参考文献(References)

[1] Du L T, Song N P, Liu K, et al. Comparison of two simulation methods of the temperature vegetation dryness index (TVDI) for drought monitoring in semi-arid regions of China[J]. Remote Sensing, 2017, 9(2): 177, doi: 10.3390/rs9020177.

[2] 姚玉璧, 张强, 李耀辉, 等. 干旱灾害风险评估技术及其科学问题与展望[J]. 资源科学, 2013, 35(9): 1884-1897. [Yao Yubi, Zhang Qiang, Li Yaohui, et al. Drought risk assessment technological progresses and problems[J]. Resources Science, 2013, 35(9): 1884-1897.]

[3] Dai A G. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(2): 52-58.
[4] Leng G Y, Tang Q H, Rayburg S. Climate change impacts on meteorological, agricultural and hydrological droughts in China[J]. Global and Planetary Change, 2015, 126: 23-34.
[5] 杨涛, 陆桂华, 李会会, 等. 气候变化下水文极端事件变化预测研究进展[J]. 水科学进展, 2011, 22(2): 279-286. [Yang Tao, Lu Guihua, Li Huihui, et al. Advances in the study of projection of climate change impacts on hydrological extremes[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(2): 279-286.]
[6] 秦大河, 丁一汇, 王绍武, 等. 中国西部生态环境变化与对策建议[J]. 地球科学进展, 2002, 17(3): 314-319. [Qin Dahe, Ding Yihui, Wang Shaowu, et al. Ecological environment change in west China and its response strategy[J]. Advances in Earth Science, 2002, 17(3): 314-319.]
[7] 刘洋洋, 章钊颖, 同琳静, 等. 中国草地净初级生产力时空格局及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2020, 39(2): 349-363. [Liu Yangyang, Zhang Zhaoying, Tong Linjing, et al. Spatiotemporal dynamics of China's grassland NPP and its driving factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(2): 349-363.]
[8] Sheffield J, Wood E F, Chaney N, et al. A drought monitoring and forecasting system for sub-Sahara African water resources and food security[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2014, 95(6): 861-882.
[9] Reichstein M, Bahn M, Ciais P, et al. Climate extremes and the carbon cycle[J]. Nature, 2013, 500(7462): 287-295.
[10] Du L, Mikle N, Zou Z H, et al. Global patterns of extreme drought-induced loss in land primary production: Identifying ecological extremes from rain-use efficiency[J]. Science of the Total Environment, 2018, 628-629: 611-620.
[11] Reyer C, Leuzinger S, Rammig A, et al. A plant's perspective of extremes: Terrestrial plant responses to changing climatic variability[J]. Global Change Biology, 2013, 19(1): 75-89.
[12] 周国逸, 李琳, 吴安驰. 气候变暖下干旱对森林生态系统的影响[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2020, 12(1): 81-88. [Zhou Guoyi, Li Lin, Wu Anchi. Effect of drought on forest ecosystem under warming climate[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2020, 12(1): 81-88.]
[13] Corinne L Q, Michael R R, Josep G C, et al. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide[J]. Nature Geoscience, 2009, 2(12): 831-836.
[14] Orinne L Q, Robbie M A, Josep G C, et al. Global carbon budget 2016[J]. Earth System Science Data, 2016, 8(2): 605-649.
[15] Yuan W P, Liu S, Zhou G S, et al. Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 143(3-4): 189-207.
[16] Prentice I C, Heimann M, Sitch S. The carbon balance of the terrestrial biosphere: Ecosystem models and atmospheric observations [J]. Ecological Applications, 2000, 10(6): 1553-1573.
[17] Rachel T P, Zhao M S, Wang H M, et al. Impact of satellite based PAR on estimates of terrestrial net primary productivity[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(19): 5221-5237.
[18] Xiao J F, Frederic C, Cecile G, et al. Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: A review of advances over 50 years[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 233: 111383, doi: 10.1016/j.rse.2019.111383.
[19] 张雪琪, 夏倩倩, 陈亚宁, 等. 近20 a塔里木河生态输水对植被总初级生产力变化的影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 718-728. [Zhang Xueqi, Xia Qianqian, Chen Yaning, et al. Effects of ecological water conveyance on gross primary productivity of vegetation in Tarim River in recent 20 years[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 718-728.]
[20] Du L T, Tian Q, Yu T, et al. A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data[J]. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 2012, 23: 245-253.
[21] He W, Ju W M, Jiang F, et al. Peak growing season patterns and climate extremes-driven responses of gross primary production estimated by satellite and process based models over North America [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 298: 108292, doi: 10.1016/j.agrformet.2020.108292.
[22] Vicca S, Balzarolo M, Filella I, et al. Remotely-sensed detection of effects of extreme droughts on gross primary production[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 28269, doi: 10.1038/srep28269.
[23] Chonggang X, Nate G M, Rosie A F, et al. Increasing impacts of extreme droughts on vegetation productivity under climate change [J]. Nature Climate Change, 2019, 9(12): 948-953.
[24] Yu Z, Wang J X, Liu S, et al. Global gross primary productivity and water use efficiency changes under drought stress[J]. Environmental Research Letters, 2017, 12(1): 5258, doi: 10.1088/1748-9326/aa5258.
[25] Zhao M S, Steven W R. Response to comments on "drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009"[J]. Science, 2011, 333(6046): 1039, doi: 10.1126/science.1199169.
[26] Ciais P, Reichstein M, Viovy N, et al. Europe-widereduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003[J]. Nature: International Weekly Journal of Science, 2005, 437(7058): 529-533.
[27] 杨洁, 王义民, 畅建霞, 等. PDSI与马尔科夫耦合的干旱预测[J]. 人民珠江, 2016, 37(8): 1-5. [Yang Jie, Wang Yimin, Chang Jianxia, et al. Drought prediction based on PDSI and Markov China Model[J]. Pearl River, 2016, 37(8): 1-5.]
[28] 黄生志, 黄强, 王义民, 等. 基于SPI的渭河流域干旱特征演变研究[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(1): 15-22. [Huang Shengzhi, Huang Qiang, Wang Yimin , et al. Evolution of drought characteristics in the Weihe River Basin based on standardized precipitation index[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(1): 15-22.]
[29] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23 (7): 1696-1718.
[30] Zhao H, Gao G, An W, et al. Timescale differences between SC-PDSI and SPEI for drought monitoring in China[J]. Physics and

Chemistry of the Earth, 2015, 102: 48-58.
[31] Alessandro A, Pierre F, Christian B, et al. Spatiotemporal patterns of terrestrial gross primary production: A review[J]. Reviews of Geophysics, 2015, 53(3): 785-818.
[32] 高振翔, 叶剑, 丁仁惠, 等. 中国植被总初级生产力对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 394-399. [Gao Zhenxiang, Ye Jian, Ding Renhui, et al. Response of vegetation gross primary productivity to climate change in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4): 394-399.]
[33] Yuan W P, Liu S G, Yu G R, et al. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(7): 1416-1431.
[34] Martin J, Sujan K, Ulrich W, et al. The FLUXCOM ensemble of global land-atmosphere energy fluxes[J]. Scientific Data, 2019, 6(1): 74, doi: 10.1038/s41597-019-0076-8.
[35] Chongya J, Youngryel R. Multi-scale evaluation of global gross primary productivity and evapotranspiration products derived from Breathing Earth System Simulator (BESS)[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 186: 528-547.
[36] Piao S L, Sitch S, Ciais P, et al. Evaluation of terrestrial carbon cycle models for their response to climate variability and to CO_2 trends[J]. Global Change Biology, 2013, 19(7): 2117-2132.
[37] Wang W L, Dungan J, Hashimoto H, et al. Diagnosing and assessing uncertainties of terrestrial ecosystem models in a multimodel ensemble experiment: 1. Primary production[J]. Global Change Biology, 2011, 17(3): 1350-1366.
[38] 侯吉宇, 周艳莲, 刘洋. 不同叶面积指数遥感数据模拟中国总初级生产力的时空差异[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(5): 1015-1027. [Hou Jiyu, Zhou Yanlian, Liu Yang. Spatial and temporal differences of GPP simulated by different satellite-derived LAI in China[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(5): 1015-1027.]
[39] 张心竹, 王鹤松, 延昊, 等. 2001—2018年中国总初级生产力时空变化的遥感研究[J]. 生态学报, 2021, 41(16): 6351-6362. [Zhang Xinzhu, Wang Hesong, Yan Hao, et al. Analysis of spatiotemporal changes of gross primary productivity in China from 2001 to 2018 based on remote sensing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6351-6362.]
[40] Running S W, Thornton P E, Nemani R, et al. Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system [C]//Sala O E, Jackson R B, Mooney H A, et al. Methods in Ecosystem Science. New York: Springer, 2000.
[41] 杜文丽, 孙少波, 吴云涛, 等. 1980—2013年中国陆地生态系统总初级生产力对干旱的响应特征[J]. 生态学杂志, 2020, 39(1): 23-35. [Du Wenli, Sun Shaobo, Wu Yuntao, et al. The response of gross primary production to drought in terrestrial ecosystems of China during 1980—2013[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(1): 23-35.]
[42] 童志辉, 熊助国, 孙睿, 等. 利用多源数据估算黑河流域总初级生产力[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 440-448. [Tong Zhihui, Xiong Zhuguo, Sun Rui, et al. Estimating gross primary production in the Heihe River Basin from multiple data sources[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 440-448.]
[43] Zheng Y, Shen R Q, Wang Y W, et al. Improved estimate of global gross primary production for reproducing its long-term variation, 1982—2017[J]. Earth System Science Data, 2020, 12(4): 2725-2746.
[44] 梁顺林, 程洁, 贾坤, 等. 陆表定量遥感反演方法的发展新动态[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 875-898. [Liang Shunlin, Cheng Jie, Jia Kun, et al. Recent progress in land surface quantitative remote sensing[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2016, 20(5): 875-898.]
[45] 薛华柱, 李阳阳, 董国涛. 基于SPEI指数分析河西走廊气象干旱时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2022, 43(11): 923-934. [Xue Huazhu, Li Yangyang, Dong Guotao. Analysis of spatial-temporal variation characteristics of meteorological drought in the Hexi Corridor based on SPEI index[J]. Chinese Journal of Agrmeteorology, 2022, 43(11): 923-934.]
[46] 王佳瑞, 孙从建, 郑振婧, 等. 近57年来黄土高原干旱特征及其与大气环流的关系[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5340-5351. [Wang Jiarui, Sun Congjian, Zheng Zhenjing, et al. Drought characteristics of the Loess Plateau in the past 60 years and its relationship with changes in atmospheric circulation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5340-5351.]
[47] Wu Z T, Yu L, Du Z Q, et al. Recent changes in the drought of China from 1960 to 2014[J]. International Journal of Climatology, 2020, 40(7): 3281-3296.
[48] 路金强, 甘容, 杨峰, 等. 基于SPEI指数的河南省干旱特征及与环流指数的相关性分析[J]. 中国农村水利水电, 2022, 474(4): 17-24. [Lu Jinqiang, Gan Rong, Yang Feng, et al. Drought characteristics and its correlation with circulation index Henan Province based on SPEI index[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022, 474(4): 17-24.]
[49] Lei T J, Wu J J, Li X H, et al. A new framework for evaluating the impacts of drought on net primary productivity of grassland[J]. Science of the Total Environment, 2015, 536: 161-172.
[50] 卫洁. 基于遥感的黄淮海冬小麦区干旱指数适应性研究[D]. 太原: 山西大学, 2019. [Wei Jie. Suitability of drought index in winter wheat area of Huang-Huai-Hai Plain based on remote sensing[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2019.]
[51] Yu T, Sun R, Xiao Z Q, et al. Estimation of global vegetation productivity from global land surface satellite data[J]. Remote Sensing, 2018, 10(2): 327, doi: 10.3390/rs10020327.
[52] 王小红, 刘宪锋, 孙高鹏, 等. 2001—2020年秦巴山区植被生产力对干旱的响应[J]. 应用生态学报, 2022, 33(8): 2105-2112. [Wang Xiaohong, Liu Xianfeng, Sun Gaopeng, et al. Response of vegetation productivity to drought in the Qinling-Daba Mountains, China from 2001 to 2020[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(8): 2105-2112.]
[53] 马志婷. 1960—2014年中国干旱时空变化及其对植被的影响[D]. 太原: 山西大学, 2018. [Ma Zhiting. Spatial and temporal variation of drought and its impact on vegetation in China during 1960—2014[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2018.]
[54] 包春兰, 陈华根. 东北平原植被对气候变化的滞后响应研究[J]. 测绘标准化, 2020, 36(3): 14-20. [Bao Chunlan, Chen Huagen.

On time-lag response of vegetation cover to climate change in Northeast Plain[J]. Standardization of Surveying and Mapping, 2020, 36(3): 14-20.]

[55] 李小燕, 任志远, 张翀, 等. 中国植被覆盖气候限制性分区及时空变化[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 76-81. [Li Xiaoyan, Ren Zhiyuan, Zhang Chong, et al. Vegetation cover restrictive zoning and temporal and spatial change of China[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2013, 41(3): 76-81.]

[56] 左冰洁, 孙玉军. 福建省几种气象干旱指数的对比分析[J]. 气象, 2019, 45(5): 685-694. [Zuo Bingjie, Sun Yujun. Comparative analysis of several drought indices to use in Fujian Province[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(5): 685-694.]

[57] 张世喆, 朱秀芳, 刘婷婷, 等. 气候变化下中国不同植被区总初级生产力对干旱的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(8): 3429-3440. [Zhang Shizhe, Zhu Xiufang, Liu Tingting, et al. Response of gross primary production to drought under climate change in different vegetation regions of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(8): 3429-3440.]

[58] Wang H Y, He B, Zhang Y F, et al. Response of ecosystem productivity to dry/wet conditions indicated by different drought indices [J]. Science of the Total Environment, 2018, 612: 347-357.

[59] 田汉勤, 徐小锋, 宋霞. 干旱对陆地生态系统生产力的影响[J]. 植物生态学报, 2007, 31(2): 231-241. [Tian Hanqin, Xu Xiaofeng Song Xia. Drought impacts on terrestrial ecosystem productivity [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31(2): 231-241.]

[60] Chen G S, Tian H Q, Zhang C, et al. Drought in the southern United States over the 20th century: Variability and its impacts on terrestrial ecosystem productivity and carbon storage[J]. Climatic Change, 2012, 114(2): 379-397.

[61] Priante N, Vourlitis G L, Hayashi M, et al. Comparison of the mass and energy exchange of a pasture and a mature transitional tropical forest of the southern Amazon Basin during a seasonal transition[J]. Global Change Biology, 2004, 10(5): 863-876.

Changes in GPP of China during the typical drought years from 1982 to 2017

CAO Yujuan[1,2], SI Wenyang[1,2], DU Ziqiang[1,2], LIANG Hanxue[1,2],
LEI Tianjie[3], SUN Bin[4], WU Zhitao[1,2]

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China; 2. Shanxi Yellow River Laboratory, Taiyuan 030006, Shanxi, China; 3. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS, Beijing 100081, China; 4. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: The reduction in gross primary productivity (GPP) resulting from drought can significantly impact the terrestrial carbon sink. Based on the standard precipitation evapotranspiration index (SPEI) calculated from the monthly meteorological data of 618 sites from the entire country and two publicly available GPP datasets (i.e., EC-LUE GPP and GLASS GPP, respectively), changes in the GPP affected on different scales by different degrees of drought in a typical drought year during 1982—2017 (2001 and 2011) in China were analyzed systematically. The results revealed that: (1) Based on the five selected indicators of the SPEI, the typical drought years during 1982—2017 were selected as 2001 and 2011. (2) On the annual and seasonal scales, the drought-affected GPP in 2001 was observed mainly in north China, northeast China, and the northern part of middle east region of China, as well as in the southeast and middle east of the southwest region of China in 2011. On the monthly scale, the GPP in May 2001 was the most severely affected by drought, mainly concentrated in most of north China and northeast China; however, in January 2011, the GPP was mainly concentrated in majority of the middle east region of China. (3) Irrespective of the annual, seasonal, or monthly scale, with the increase in the degree of drought, the decline rate of GPP was higher, and the impact of extreme drought was the highest. For example, on the seasonal scale, the decline in the GPP during extreme drought in the summer of 2001 was 19.96% (EC-LUE GPP) and 15.57% (GLASS GPP), and the decline in the GPP during extreme drought in the spring of 2011 was 14.32% (EC-LUE GPP) and 8.75% (GLASS GPP). The results revealed can further deepen the understanding of the effect of different grades of drought on GPP, which is key for understanding the exchange of carbon between the land and atmosphere under drought conditions.

Key words: typical drought; standardized precipitation evapotranspiration index; gross primary productivity; China